海底トンネル周辺地盤の透水性低下に伴う 覆工の力学的挙動に関する考察

深沢 成年¹·柏木 亮²·西藤 潤³

¹フェロー会員 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1) E-mail:nar.fukazawa@jrtt.go.jp

²正会員 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 (〒231-8315横浜市中区本町6-50-1) E-mail:ryo.kashiwagi@jrtt.go.jp

³正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C1) E-mail:saito.jun.3n@kyoto-u.ac.jp

青函トンネルは、最深部が海面下240mに位置し、海水がトンネル湧水として作用することから、建設 時には事前薬液注入により周辺地盤の透水性を低下させ掘削を行うとともに、建設後は基本的に覆工に高 水圧が直接作用しない構造となっている.一方、坑内湧水量は年々減少する中、内空変位は徐々にではあ るものの大きくなっており、周辺地盤の透水性低下と覆工の挙動の関連性を検討することで、将来に亘る トンネルの健全性を明らかにする必要がある.そこで本研究では、周辺地盤の透水性変化がトンネルに及 ぼす影響についてモデル化し、解析を行った.その結果、トンネル断面の変形モード、覆工応力ともに計 測結果とほぼ同様の傾向を示す解析結果が得られた.

Key Words : undersea tunnel, permeability decrease, lining stress, lining displacement

1. 緒論

津軽海峡下で本州と北海道を結ぶ青函トンネルは、最 深部が海面下240mに位置する延長53.9km(海底区間 23.3km)の長大海底鉄道トンネルとして、1988年3月に 在来線が開業、2016年3月には北海道新幹線の路線とし ても使用されることとなった、国内の旅客・貨物輸送の 根幹とも言える土木構造物である(図-1).

一般に海底トンネルの建設及び維持管理においては、 無尽蔵の海水とそれに伴うトンネル周辺に作用する大き な間隙水圧の対策が最大の課題といえる.青函トンネル では、2.4MPa に及ぶ高水圧と無尽蔵の海水への対策と して、トンネル半径の 3~5 倍程度の範囲の周辺地山に 事前注入を行い、透水性を低下させた注入域で水圧を受 けることを基本とし、さらに注入域を通過した湧水は覆 工背面で導水され、基本的には覆工に高水圧が直接作用 しない構造となっている(図-2).

長期計測の結果から,現在,青函トンネルの坑内湧水 量は年々減少していることがわかっているが,一方で内 空変位は徐々にではあるものの大きくなっており,トン ネルの健全性を考える上では,湧水量と内空変位の値が 覆工にどのような影響を与えているか把握しておく必要 がある.

土谷ら¹は、湧水量の変化がトンネルの挙動に及ぼす 影響を数値解析により検討し、湧水量低下の原因が注入 域の透水性低下とした場合は覆工の健全度は確保される が、覆工背面の導水機能低下が要因であった場合、覆工 の健全性に問題が生じる可能性があることを指摘してい る. また、西藤ら²は、周辺地盤の透水性低下のパター ンとして3つのケースを想定、モデル化し、覆工に生じ る応力状態の変化やトンネル周辺の水圧分布の変化につ いて調べている.その結果、時間に依存した周辺地盤の 透水性低下を考慮した解析により、湧水量の減少によっ てトンネル覆工の健全性はないとの結論を示している.

これらの研究では、解析により海底トンネルと周辺地 盤の状況を再現し、健全性を評価しているが、得られた 解析値と計測値について分析し評価しているものではな い.そこで、本研究では、北海道新幹線の開業を契機に、 これまでの目視による外観検査、内空変位、覆工の応力 測定といいた計測結果等に加え、25年以上経過した長大 海底トンネルの健全性に関して、湧水量が減少する状況 下においてトンネル覆工の応力状態など力学的挙動につ いて検討し、計測値との関係性について分析し、トンネ ルの健全性について考察を加える.



2. 力学的挙動の検討

本研究で行った検討は,西藤ら²が行った解析手法と 同じものを用いているが,その概要を示す.

(1) 解析の概要

周辺地盤の透水性低下に伴う覆工の力学的挙動を検討 するため、湧水量の減少量をもとに周辺地盤の透水性低 下をモデル化し、周辺地盤での透水性変化のパターンを 想定し、覆工に生じる応力、内空変位、及びトンネル周 辺の水圧分布の変化について調べた.

まず,図-3のような海面下240m,海底下100mにトンネルが存在する領域を考え,対称性から右半分のみを 解析領域とした.解析に用いた有限要素メッシュを図-4 に示す.なお,境界条件は上側を自由表面,左右両側お よび下側をスライダー支持とした.水理境界条件は,上 側,右側,下側を排水境界とし,左側を対称軸として非 排水境界としている.

トンネル覆工および周辺地盤は弾完全塑性体として考 え,2次元平面ひずみ条件下において,土-水連成有限 要素解析を行う.解析で用いた物性値は**表-1**のとおり.

(2) 解析の流れ

解析はトンネルの施工過程を踏まえ、図-5に示すよ



図-3 解析領域²⁾



表-1 解析に用いた物性値²⁾

	一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一一	注入成	非注入域
Young 率 [kPa]	3.0×10^7	3.0×10^5	3.0×10^5
Poisson 比	0.20	0.33	0.33
透水係数 [m/s]	-	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-6}
粘着力 [kPa]	5.0×10^4	5.0×10^2	$5.0 imes 10^2$
内部摩擦角	50°	30°	30°
ダイレイタンシー角	40°	20°	20°
単位体積重量 [kN/m ³]	25	20	20

うに(Ⅰ) 掘削段階, (Ⅱ) 覆工完成直後, (Ⅲ) 長期間経過 時の3段階に分けて計算を実施した.

(I)掘削段階

掘削前の地盤には等方的な全応力が作用していると仮定し,掘削段階では掘削相当外力fを応力解放係数 a(0< a<1)の分だけ解放させる.海底部は主に側壁導坑先進上部半断面工法で施工されているが,覆工コンクリート背面への裏込め注入や注入域の存在により,地山から覆工コンクリートに作用する荷重は大きく軽減されているので,応力解放率は 95%(a=0.95)とした.

(Ⅱ) 覆工完成直後

覆工を建設した後、掘削に伴い周辺地盤が緩むことか

- ら, 覆工に(1- α)fの力を分担させる.
- (Ⅲ) 長期間経過時

湧水量低下を考慮し,経年とともにトンネル周辺地盤 の透水性を低下させるモデルを考える.具体的には,覆 工に向かって流れ込む海水に含まれる細粒分が,注入域 の覆工背面側から非注入域側へ向かって目詰まりを起こ し,徐々に注入域の一部で透水性が低下する状態を想定 した(図-6).

(3) 経年変化による透水係数の設定

青函トンネルの湧水量は 1988 年から 2010 年までの約 20 年で,約 23%程度減少していることから,解析では, 湧水量が 20 年間で約 25%減少するよう透水係数を低下 させた. その後さらに 20 年経過して湧水量が約 40%ま で減少することを想定し,透水係数を低下させることで 将来予測も実施した.

まず、60ヶ月でメッシュ1層分(0.3m)の透水係数を k_1 = 1.0×10^8 [m/s] から k'_1 = 3.5×10^9 [m/s]まで低下させる.1 層分透水性が k'_1 まで低下したら、同様にその外側の1 層の透水性が k_1 から k'_1 まで低下する.上記の手順を8 層分、つまり40年分行った(図-7).透水係数の低下する層の長さは2.4mである.





(4) 解析結果

解析では、トンネル周辺地盤の要素で透水係数を低下 させ、それに起因するトンネル周辺の水圧分布、トンネ ル覆工の応力状態、周辺地盤の応力状態、塑性領域の変 化、覆工応力、内空変位等を調べた.

解析値の要素位置を図-8に示す.トンネル覆工に作用 する最大主応力,トンネルの内空変位量はそれぞれ表-2, 表-3のような値となった.

最大主応力については、覆工全体に概ね20MPa前後の 応力が発生しており、時間変化による透水係数の低下に 伴う影響はさほど見られない結果となった. なお、下半 側壁部では、20年後から40年後にかけて応力が減少傾向 を示しているが、これは西藤ら²⁾によると、透水性低下 領域が広がるにつれて間隙水圧が増加傾向から減少傾向 に移行し、その分有効応力が増加したため、塑性域から 弾性域に戻ったからと考えられる.

内空変位量については、透水係数の低下に伴い、徐々 に値が大きくなっているものの、その変化自体は小さく なっており、40年後においても2mm以下との結果が得ら れた.なお、正の値は周辺地盤側への変位を、負の値は トンネル内空側への変位を表している.



図-8 解析値の要素位置

表-2 覆工に作用する最大主応力

			(単位:MPa)
	1ヶ月後	20年後	40年後
①天端部	18.1	18.4	18.9
②上半7-7部	18.7	18.2	18.3
③上半アーチ・下半側壁部	20.2	19.5	19.1
④下半側壁部	22.5	23.0	22.5
⑤下半側壁・イバート部	25.4	26.9	26.7
⑥イバート部	11.8	9.1	10.0

表-3 内空変位量

				(単	é位:mm)
	1ヶ月後	10年後	20 年後	30年後	40年後
⑦上半アーチ部	0.01	-0.98	-1.51	-1.77	-1.87
⑧下半側壁部	0.01	0.31	0.64	0.92	1.16

※要素変位量の倍の値としている

3. 解析結果と計測結果の分析

(1) 内空変位

青函トンネルの内空変位計測は、開業以来、陸上部分 を含む80断面において、変位量の大きさや推移に応じ、 現在では1~4回/年の頻度で実施している.図-9に本坑 内空変位計測の側線を、図-10に水平側線の変位量の度 数分布を、表-5に変形モードの分類結果を示す.なお、 正負は表-3と合致している.計測結果によると、全80断 面の92%の内空変位が±2mm以内(平均-0.95mm)との 結果が得られている.また、上下半ともに断面内に縮小 するAパターン(約50%)、上半は縮小し下半は拡大す るCパターン(約40%)が大半を占めていることがわか っている.

以上より, 表-3の内空変位量に着目すると,約40%の 計測断面で見られる,上半は縮小し下半は拡大するCパ ターンと合致することから,本解析では計測結果の一般 的な挙動を再現することができたものと考えている.



図-9 内空変位計測の側線³⁾



図-10 変位量の度数分布³⁾

(2) 覆工応力

応力計測は、変位が約4mm程度と比較的大きい2断面 で2005年~2010年にかけて順次実施された. 覆工の応力 の計測結果を図-11に、解析値と計測値を表-6に示す. 表-6の計測値は平面孔底ひずみ法による二次元計測によ り測定された覆工内面側の値である. 解析値、計測値と もに最大で約20MPaの応力が発生しているが、全体的に 解析値の方が大きな値となっている. また、下半側壁部 ~インバート部の値には乖離が見られる. これは解析で は覆工とインバートが剛結された円形構造物であるのに 対し、実際の施工では青函トンネルの覆工がサイロット により、側壁、アーチ、インバートと段階的に施工され、 断面が不連続となっている点、アーチ部の荷重を側壁部 で支持し、インバートには荷重が伝達しにくい形状であ るのではと考えられる. また、必ずしも覆工が地山に十 分密着しているものではない可能性も十分に考えられる.

(3) まとめ

以上より、本解析により計測結果の一般的な挙動を再 現することができたが、変位が約4mm程度と比較的大き な断面と合致する結果までは必ずしも得られていない.



表-5 内変形パターンと発生箇所数³⁾

表-6 覆工応力の解析値・計測値

		(単位:MPa)
	解析値 (20 年後)	計測値 (二次元)
①王姆如	(20 平夜)	E 7
して言言	10.4	0.7
②上半アーチ部	18.2	16.2
③上半アーチ・下半側壁部	19.5	7.3
④下半側壁部	23.0	4.2
⑤下半側壁・インバート部	26.9	4.7
⑥インバート部	9.1	1.0



図-11 覆工の応力計測結果 (No.63 断面)³⁾

しかしながら,解析結果によると,覆工応力は十分に安 全側の値となっており,今後湧水量が減少していったと しても応力はさほど大きくならないことが確認できた. したがって,覆工背面の導水機能が低下する等の場合を 除き,実際の覆工に作用する応力が解析値を上回ること は考えにくく,内空変位及び覆工応力の値は,今後収束 傾向に向かうものと想定される.

なお、青函トンネルでは、覆工の許容応力度を設計基 準強度の1/3の6.0MPaとし、下半側壁とインバートはピ ン構造とした2次元弾性FEM解析により、健全度判定の 目安となる水平側線の内空変位量を設定し維持管理を行 っているが、覆工厚70cmでは、内空変位量が約6.5mmま でであれば、覆工の安全性は確保されるとの指標も存在 する⁴. この場合においても、本解析値および計測値の 結果は、問題ないことが確認できる.

4. 結論

青函トンネルでは、維持管理に当たり、覆工コンクリートの健全度判定の目安となる、本坑内変位量の管理目安値を一律5mmに設定している.近年の計測結果では、

管理目安値に近づいている断面が数か所存在している一 方,解析結果では,開業から40年後であっても内空変位 量が2mm程度(上半アーチ部)との結果が得られた.ま た,解析では計測断面の約40%に見られる,計測結果の 一般的な挙動を再現することができた.さらに,覆工応 力についても計測値と同レベルの,最大で約20MPa程度 の応力が発生しているとの解析結果が得られた.

以上から、施工方法と解析モデルを完全に一致させる ことができなかったことにより、計測結果と解析結果の 値に若干の差はあるものの、トンネル覆工の応力状態、 変位等が解析により再現され、その力学的挙動のメカニ ズム、及び解析の妥当性を確認することができた.また、 湧水量低下に伴う海底トンネルへの影響については、周 辺地盤の透水性低下をモデル化することで、注入域の存 在による効果が非常に大きいことを改めて確認すると同 時に、これまで実施してきた計測を今後も継続的に実施 していくことで、トンネルの健全性を確認できることが わかった.

今後は、施工方法と計測結果をより再現した解析を実施することで、湧水量低下がさらに進んだ際の海底トンネルに与える影響等について検討を行うことが重要と考えている.

参考文献

- 土谷幸彦,倉川哲志,工藤健,小西真治,小島芳之,東畑郁 夫:海底トンネルの覆工の長期挙動と評価に関する 研究,土木学会論文集 C,Vol.63,No3,pp.825-834,2007.
- 西藤潤,丹生和宏,岸田潔,深沢成年: 湧水量が低下する 海底トンネルの力学的安全性に関する基礎的研究, 土 木学会論文集 F1(トンネル工学),Vol. 67,No. 3,pp. I _25-I_32,2011.
- 3) 深沢成年,小林寛明,張信一郎,三谷憲司,保田尚俊,朝倉 俊弘:内空変位の長期計測と覆工応力計測に基づく 長大海底トンネルの健全性評価,土木学会論文集Fl(ト ンネル工学), Vol. 72, No.1, pp.1-10,2016.
- 4) 日本鉄道建設公団札幌工事事務所:青函トンネル維持管 理業務資料,1998.3

(2016.8.5 受付)

MECHANICAL BEHAVIOR OF THE LINING DUE TO THE PERMEABILITY REDUCTION IN THE UNDERSEA TUNNEL SURROUNDING GROUND

Naritoshi FUKAZAWA, Ryo KASHIWAGI and Jun SAITO

In Seikan Tunnel, underground seepage water have been decreased year by year, but the inner space displacement is gradually larger. To examine the relevance of the behavior of the lining and the permeability decrease of the surrounding ground, the tunnel over the future there is a need to clarify the soundness. In this paper, We are permeability changes in the surrounding ground has been analyzed for the effects on tunnel. It has confirmed that the mechanical behavior of the lining shows almost the same tendency as the result of measurement.